

# 基于时间-有色 Petri 网的电梯系统的建模与分析

宗 群, 窦立谦, 程义菊

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

**[摘要]** 根据时间 Petri 网和有色 Petri 网的知识, 提出了基于时间-有色 Petri 网 (TCPN) 的电梯运行模型。依据此模型将电梯在每层的运行情况分类说明。电梯如何运行是由控制命令统一调度, 控制命令是由与电梯运行状态相应的颜色集组成。最后举例说明此模型可在单台电梯控制系统和电梯群控系统中应用。

**[关键词]** Petri 网; 时间-有色 Petri 网; 电梯模型; 电梯运行

**[中图分类号]** TU857 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2004) 12-0051-05

## 1 前言

在大楼中配置电梯, 其目的是为用户提供方便、高效的服务, 这就需要对电梯进行合理配置和调度。为此, 首先要了解电梯的运行情况, 并建立电梯的运行模型。选择将时间 Petri 网和有色 Petri 网相结合的方法建立电梯系统的运行模型。a. 电梯运行过程和各种状态都要消耗一定的时间, 例如电梯的开门和关门, 电梯在层与层之间的运行, 电梯服务时等待乘客上下等, 这些时间在 Petri 网的电梯模型中可以用时间变迁表示出来<sup>[1]</sup>, 这使得电梯模型的图形表示更加直观。b. 电梯含有 3 种运行状态 (即上行、下行、停止服务状态), 因此将有色概念引入, 用不同的颜色 Token 表示电梯不同的运行状态, 不同颜色的 Token 沿不同的路径运行, 这可以大大降低模型的复杂性, 易于理解电梯的运行过程。将 Petri 网的时间和有色概念相混合, 使电梯模型更接近于实际的电梯运行情况。

## 2 Petri 网的基本概念

Petri 网的概念最早在 1962 年 Carl Adam Petri 的博士论文中提出来的。它是一种适合于系统描述和分析的图形工具和数学工具, 具有直观的图形表

示和严密的数学基础, 很快在研究并行、异步、离散、非线性和随机问题中得到广泛应用。作为图形工具, 它具有类似于流程图、框图和网图的可视描述功能; 作为数学工具, 用它可以建立状态方程、代数方程和其他数学模型来描述系统的行为。

### 2.1 Petri 网

一个 Petri 网<sup>[2]</sup> (PN) 是一个 5 元组:

$$PN = (P, T; F, W, M_0)$$

其中:  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ , 是有限个库所的集合;  
 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ , 是有限个变迁的集合;  
 $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ , 是弧的集合;  
 $W: F \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ , 是弧权函数;  
 $M_0: P \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ , 初始标识 (marking)。

库所表示一个对象的状态、存放场所或条件, 变迁表示变化或事件, 库所中的对象或条件用 token 表示。

### 2.2 时间 Petri 网

定义 1 当某一变迁的发生条件满足时, 若该变迁要延迟一段时间后才从相应的输入库所中移走相应的 token 并得到发生后果, 或该变迁发生后, 立即从相应的输入库所中移走相应的 token, 但要延迟一段时间后才能得到发生后果, 则称这样的变

迁为时间变迁。

定义2 当某一变迁的发生条件满足时,若该变迁立即从相应的输入库中所移走相应的 token,且立即能得到发生后果,则称这样的变迁为瞬时变迁。

一般时间变迁用扁长方形表示,瞬时变迁用线段表示。

时间网中表示时间的持续时间的的方法有2种,一种是将各事件的持续时间标在库所的旁边,表示库所中产生的 token 要经过一定的时间才能参与网中的运行。另一种方法是将时间标注在变迁的旁边,表示当该变迁具有发生条件时要延迟一段时间后才能发生,或该变迁发生后立即从相应的输入库中所移走相应的 token,但要延迟一段时间后才在相应的输出库所中产生相应的 token<sup>[3]</sup>。笔者使用的时间 PN 网是用后一种方法。

2.3 有色 Petri 网

在一般的 Petri 网中,标记都是不加区别的,且对个体变化细节描述过多,不利于对系统的理解。为了简化系统模型以及增加模型的表达能力,人们提出了有色 Petri 网的概念。这类网的系统中,标记可以用颜色加以区别,同类的标记赋予相同的颜色,不同的标记赋予不同的颜色。这样,一个库所中就可以包含几种对象,或者表达一个复合条件,一个变迁也可以表达几种不同的变化。

定义3 一个有色 Petri 网<sup>[4, 5]</sup> (CPN) 是一个7元组:  $CPN = \{P, T; F, C, I_-, I_+, M_0\}$ 。

其中,  $\{P, T; F\}$  是基网;  $C$  是颜色集合,当  $p \in P$  时,  $C(p)$  是关于  $P$  中 token 的一个颜色集合,即 token 色基,当  $t \in T$  时,  $C(t)$  是关于  $t$  的发生的一个颜色集合,即出现色基;  $I_-, I_+$  是负函数和正函数,它们是用来确定变迁的发生方式后库所中 token 的变化,对于所有的  $(p, t) \in P \times T$ :

$$\begin{aligned}
 I_-(p, t) &\in [C(t)_{MS} \rightarrow C(p)_{MS}]_L & (p, t) &\in P \times T, \\
 I_-(p, t) &= 0 & (p, t) &\notin P \times T, \\
 I_+(p, t) &\in [C(t)_{MS} \rightarrow C(p)_{MS}]_L & (t, p) &\in P \times T, \\
 I_+(p, t) &= 0 & (t, p) &\notin P \times T,
 \end{aligned}$$

其中  $S_{MS}$  表示定义在  $S$  上的所有有限多重集的集合,  $[*]_L$  表示线性函数的集合,  $M_0$  是初始标识。

将时间和有色的概念相混合,吸取二者的长处,建立了基于有色-时间 Petri 网的电梯模型。

3 基于时间-有色 Petri 网的电梯模型

模型如图1所示,设颜色集合  $D = \{\text{Red, Blue, Green, Empty}\}$ ;  $D_1 = \{\text{Red, Blue, Green}\}$ ;  $D_2 = \{\text{Empty}\}$ ;  $D_1$  中3种颜色分别用  $R, B, G$  表示,它们分别代表电梯的上行,停止和下行状态;  $D_2$  中颜色用  $E$  表示,它代表空命令,对于电梯的运行状态无意义。

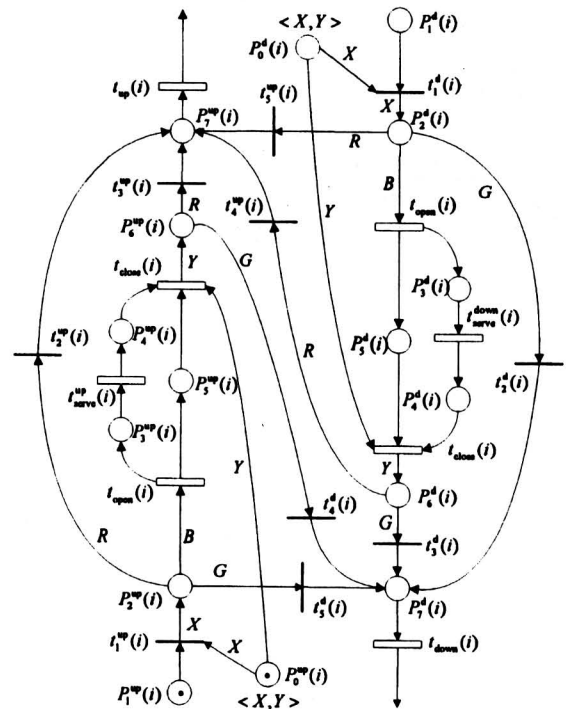


图1 电梯单层 Petri 网模型

Fig.1 Petri net model for the elevator running in single floor

以电梯上行至第  $i$  层为例,如图1左半边所示:

1)  $\langle X, Y \rangle$  是控制命令。  $X, Y \in D$ , 当  $X, Y \in D_1$  时,从  $P_0^{up}(i)$  到  $t_1^{up}(i)$  的输入函数  $I_-(P_0^{up}(i), t_1^{up}(i)) = 1$ ,从  $P_0^{up}(i)$  到  $P_6^{up}(i)$  的输入函数  $I_-(P_0^{up}(i), t_{close}(i)) = 1$ ; 否则,  $I_-(P_0^{up}(i), t_1^{up}(i)) = \infty, I_-(P_0^{up}(i), t_{close}(i)) = \infty$ 。

某个变迁  $t_i$  的输入、输出函数  $I_-$  和  $I_+$  等于1,表示此变迁可发生,且发生前后与  $t_i$  相连的库所的颜色 token 的颜色不发生变化。(  $t_1^{up}(i), t_{close}(i), t_1^d(i)$  除外)

2)  $I_+(P_2^{\text{up}}(i), t_1^{\text{up}}(i)) = I_-(P_0^{\text{up}}(i), t_1^{\text{up}}(i))$ ,  
 $I_+(P_6^{\text{up}}(i), t_{\text{close}}(i)) = I_-(P_0^{\text{up}}(i), t_{\text{close}}(i))$ 。且在  
 $t_1^{\text{up}}(i)$ 变迁实施情况下,  $C(P_2^{\text{up}}(i)) = X$ , 即库所  $P_2^{\text{up}}(i)$   
 得到颜色 token  $X$ 。同理, 在  $t_{\text{close}}(i)$ 变迁实施情况下,  
 $C(P_6^{\text{up}}(i)) = Y$ , 即库所  $P_6^{\text{up}}(i)$  得到颜色 token  $Y$ 。

3) 在库所  $P_2^{\text{up}}(i)$ 有 3 条输出线路:  $R, B, G$ ; 库  
 所  $P_6^{\text{up}}(i)$ 有 2 条输出线路  $R$  和  $G$ , 分别代表:

- a. IF  $C(P_2^{\text{up}}(i)) = R$ ,  
 THEN  $I_-(P_2^{\text{up}}(i), t_2^{\text{up}}(i)) = 1$ ,  
 ELSE  $I_-(P_2^{\text{up}}(i), t_2^{\text{up}}(i)) = \infty$ ;
- b. IF  $C(P_2^{\text{up}}(i)) = B$ ,  
 THEN  $I_-(P_2^{\text{up}}(i), t_{\text{open}}(i)) = 1$ ,  
 ELSE  $I_-(P_2^{\text{up}}(i), t_{\text{open}}(i)) = \infty$ ;
- c. IF  $C(P_2^{\text{up}}(i)) = G$ ,  
 THEN  $I_-(P_2^{\text{up}}(i), t_5^{\text{d}}(i)) = 1$ ,  
 ELSE  $I_-(P_2^{\text{up}}(i), t_5^{\text{d}}(i)) = \infty$ ;
- d. IF  $C(P_6^{\text{up}}(i)) = R$ ,  
 THEN  $I_-(P_6^{\text{up}}(i), t_3^{\text{up}}(i)) = 1$ ,  
 ELSE  $I_-(P_6^{\text{up}}(i), t_3^{\text{up}}(i)) = \infty$ ;
- e. IF  $C(P_6^{\text{up}}(i)) = G$ ,  
 THEN  $I_-(P_2^{\text{up}}(i), t_4^{\text{d}}(i)) = 1$ ,  
 ELSE  $I_-(P_2^{\text{up}}(i), t_4^{\text{d}}(i)) = \infty$ 。

也就是说, 根据不同 token, 自动选择不同的运动  
 路线。

4) 图 1 中未作标注的变迁的输入、输出函数  
 的权值为 1。

若电梯正下行至第  $i$  层, 即图 1 的右半部分,  
 与以上电梯上行分析类似。

现就电梯的实际运行情况进行分析: 其中,  
 $P_0^{\text{up}}(i)$ 为控制单元, 其 token 由控制器给出;  
 $P_1^{\text{up}}(i)$ 电梯到达第  $i$  层, 等待命令;  
 $P_2^{\text{up}}(i)$ 电梯处于第  $i$  层, 根据不同命令运行;  
 $P_3^{\text{up}}(i)$ 电梯在第  $i$  层, 开门后等待服务状态;  
 $P_4^{\text{up}}(i)$ 服务完成等待关门状态;  
 $P_5^{\text{up}}(i)$ 在第  $i$  层, 正处于服务状态;  
 $P_6^{\text{up}}(i)$ 服务完成, 梯门关闭状态;  
 $P_7^{\text{up}}(i)$ 电梯在第  $i$  层, 即将上升状态;  
 $t_1^{\text{up}}(i), t_2^{\text{up}}(i), t_3^{\text{up}}(i), t_4^{\text{d}}(i), t_5^{\text{d}}(i)$ 为瞬时变迁;  
 $t_{\text{open}}(i)$ 为电梯开门时间;  
 $t_{\text{close}}(i)$ 为电梯关门时间;  
 $t_{\text{serve}}^{\text{up}}(i)$ 电梯在第  $i$  层服务时间;

$t_{\text{up}}(i)$ 为电梯从第  $i$  层到第  $i+1$  层的时间;

假设电梯正向上运行, 刚到达第  $i$  层, 如如图  
 1 所示, 在  $P_1^{\text{up}}(i)$ 有一个 Red 色的 token。此时可  
 以分为下面几种情况:

1) 控制器给出命令  $\langle X, Y \rangle = \langle R, R \rangle$ , 则电  
 梯沿  $P_1^{\text{up}}(i) \rightarrow t_1^{\text{up}}(i) \rightarrow P_2^{\text{up}}(i) \rightarrow t_2^{\text{up}}(i) \rightarrow P_7^{\text{up}}(i) \rightarrow$   
 $t_{\text{up}}(i)$ 方向运行, 即代表电梯在此层不停车而继续  
 上行;

2) 若命令  $\langle X, Y \rangle = \langle B, R \rangle$ , 则按  $P_1^{\text{up}}(i) \rightarrow$   
 $t_1^{\text{up}}(i) \rightarrow P_2^{\text{up}}(i) \rightarrow t_{\text{open}}(i) \rightarrow t_{\text{serve}}^{\text{up}}(i) \rightarrow t_{\text{close}}(i) \rightarrow$   
 $P_6^{\text{up}}(i) \rightarrow t_3^{\text{up}}(i) \rightarrow P_7^{\text{up}}(i) \rightarrow t_{\text{up}}(i)$ 方向运行, 表示在  
 此层先停车服务, 然后继续上行;

3) 若命令  $\langle X, Y \rangle = \langle B, G \rangle$ , 则按则按  $P_1^{\text{up}}(i) \rightarrow$   
 $t_1^{\text{up}}(i) \rightarrow P_2^{\text{up}}(i) \rightarrow t_{\text{open}}(i) \rightarrow t_{\text{serve}}^{\text{up}}(i) \rightarrow t_{\text{close}}(i) \rightarrow$   
 $P_6^{\text{up}}(i) \rightarrow t_4^{\text{d}}(i) \rightarrow P_4^{\text{d}}(i) \rightarrow t_{\text{down}}(i)$ 方向运行, 表示在  
 此层先停车服务, 然后调转方向, 向下运行;

4) 若命令  $\langle X, Y \rangle = \langle G, G \rangle$ , 则按则按  $P_1^{\text{up}}(i) \rightarrow$   
 $t_1^{\text{up}}(i) \rightarrow P_2^{\text{up}}(i) \rightarrow t_5^{\text{d}}(i) \rightarrow P_7^{\text{up}}(i) \rightarrow t_{\text{down}}(i)$ 方向  
 运行, 表示在此层不做任何服务, 直接调转方向, 向  
 下运行;

5) 若命令  $\langle X, Y \rangle = \langle B, B \rangle$ , 则按  $P_1^{\text{up}}(i) \rightarrow$   
 $t_1^{\text{up}}(i) \rightarrow P_2^{\text{up}}(i) \rightarrow t_{\text{open}}(i) \rightarrow t_{\text{serve}}^{\text{up}}(i) \rightarrow t_{\text{close}}(i) \rightarrow$   
 $P_6^{\text{up}}(i)$ 方向运行, 停在  $P_6^{\text{up}}(i)$ 处, 表示在此层停车  
 服务, 关门, 然后停在此层, 等待下一步的命令;

6) 若命令  $\langle X, Y \rangle = \langle B, E \rangle$ , 则按  $P_1^{\text{up}}(i) \rightarrow$   
 $t_1^{\text{up}}(i) \rightarrow P_2^{\text{up}}(i) \rightarrow t_{\text{open}}(i) \rightarrow t_{\text{serve}}^{\text{up}}(i)$ 方向运行, 表示  
 在此层停车, 开门服务, 不关门, 然后停在此层, 等  
 待下一步的命令;

7) 若命令  $\langle X, Y \rangle = \langle E, E \rangle$ , 则表示电梯上升  
 到第  $i$  层, 不作任何服务, 停在此层, 等待下一  
 步的命令。

若电梯处于下行或停止状态, 情况与上行状态  
 类似, 此处不再列举。

## 4 单台电梯系统模型

图 1 为电梯运行的单层 Petri 网模型, 应用此  
 模型可以构造出单台电梯系统的模型。假设某大楼  
 为 6 层, 配置一台电梯, 则此电梯系统模型见  
 图 2。

每一层都是图 1 所示的模型, 控制单元在每一  
 层都刷新一次控制命令队列。控制命令队列是由从  
 当前位置开始响应各个呼梯要求的控制命令组成。

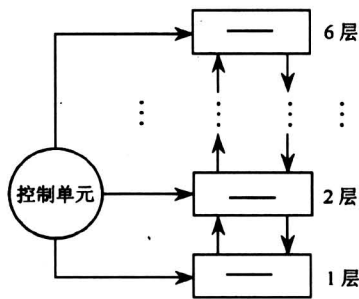


图2 单台电梯系统模型

Fig.2 Model for the single elevator system

现假设电梯正处于第二层向上运行（见图3），此时电梯控制单元的控制命令队列元素为10个，分别为  $\{ \langle R, R \rangle, \langle B, R \rangle, \langle R, R \rangle, \langle R, R \rangle, \langle B, G \rangle, \langle B, G \rangle, \langle G, G \rangle, \langle G, G \rangle, \langle G, G \rangle, \langle B, R \rangle \}$ 。根据此命令队列可以估算每层的到达时间。设电梯运行参数已知，开关门时间为3s，电梯从第*i*层到第*i*+1层的上升时间为5s，电梯在每层的平均服务时间为10s。此时电梯到达每层的时间见表1。

	6	●	
	5		▼
	4		
	3	●	▲
▲	2		
	1		▲

电梯运行状态 层 内选 外呼

图3 电梯运行情况

Fig.3 The state of elevator running

尽管在单台电梯系统中，估算到达每层的时间并不是很重要，但对于智能群控系统，这种计算却有突出的重要性。

### 5 多台电梯群控模型<sup>[6]</sup>

将多台电梯群控系统比作一间房子，那么图1所示的楼层电梯 Petri 网模型就是砖瓦，可以像盖房子一样搭建出多台电梯系统的模型。假设某智能大厦高为*N*层，配置了*M*台电梯，则模型如图4所示（每一层单元如图1所示）。

对于多台电梯控制，现在存在多种策略。如传统的呼梯分配策略，最小等候时间策略，智能控制

策略如专家控制、模糊控制、神经网络等。无论那种控制方式，都需要采集电梯运行的动态数据进行处理，然后通过某种计算，以一种相对适合的方式将电梯分配到各个目的楼层，以满足各方的需求（尽量减少等候时间，降低长时间等候的概率，减小电梯运营成本）。基于时间-有色 Petri 网的电梯系统模型可用于各种电梯运行时间的估算，根据控制队列可以估算电梯开关门次数，电梯的行程时间和距离，从而可进行各种电力损耗和成本估算。

表1 电梯到达每层的时间估计表

Table 1 The estimated time table of the elevator arrive every floor

层数	↑到达时间/s	↓到达时间/s	↑到达时间/s
6	33		
5	28	51	
4	23	56	
3	5	61	
2		66	89
1		71	

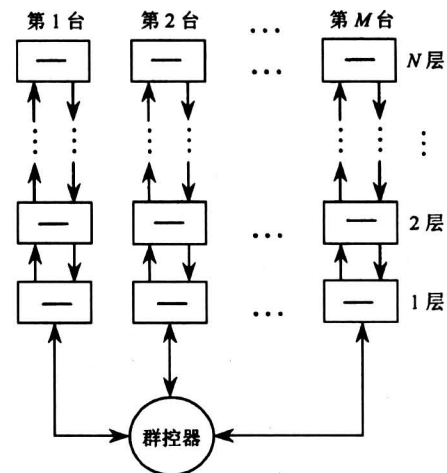


图4 多台电梯系统模型

Fig.4 Model for the multi-elevators system

### 6 结论

在时间和有色 Petri 网的基础上，提出了一种基于时间-有色 Petri 网的电梯系统的运行模型。通过此模型可以直观的表示出电梯在每层的运行情况，通过2种颜色命令的组合，可以任意调度电梯的上、下、停以及开门关门等情况。控制队列可以实现对电梯到达时间的估算，可应用于多种类型的电梯系统。

## 参考文献

- [ 1 ] Cho Y C, Gagov Z, Kwon W H. Timed Petri net based approach for elevator group controls [ A ]. Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems [ C ]. 1999
- [ 2 ] Murata T. Petri nets: properties, analysis and applications [ J ]. Processing of the IEEE, 1989, 77 (4): 541~580
- [ 3 ] 林 闯. 随机 Petri 网和系统性能评价 [ M ], 北京: 清华大学出版社, 2000
- [ 4 ] 袁崇义. Petri 网原理 [ M ], 北京: 电子工业出版社, 1998
- [ 5 ] Sun Xin, Fei Minri, Sun Youxian. The application of coloured Petri nets in systems analysis [ A ]. Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation [ C ]. China: Shanghai, June 10 - 14, 2002
- [ 6 ] Ho Yuanwei, Fu Lichen. Dynamic scheduling approach to group control of elevator systems with learning ability [ A ]. Proceedings of 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation San Francisco [ C ]. CA, April 2000

## Modeling and Analysis of Elevator System Based on Timed-Coloured Petri Net

Zong Qun, Dou Liqian, Cheng Yiju

(*School of Electric and Automation Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

[**Abstract**] In this paper, an elevator running model based on timed-coloured Petri net is proposed. The running of elevator is classified according to the model. The running of elevator is controlled by the command of controller. And the command of controller is composed of the color aggregates which have a connection with the running states of elevator. In the end, an example of the application of the model in single elevator system and the elevator group control system is given.

[**Key words**] Petri net; timed-coloured Petri net; the model of elevator; the running of elevator

(cont. from p. 42)

## Spatial Nonlinear Analysis of the Reasonable Cable Tension for a Thousand-meter Scale Cable-stayed Bridge Under Permanent Loads

Zhang Jianmin, Xiao Rucheng

(*Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

[**Abstract**] In this paper, a model for spatial nonlinear optimization programming to obtain the prestresses of cables in the cable-stayed bridge is established, in which the bending strain energy of the beams for the bridge and the cable tower is the objective function, and structural stresses and the cable forces are the constraint conditions. In order to determine the prestresses of the cables of the bridge, the first order optimization method is used to solve the program. This method is used to obtain set of optimal cable tensions of a thousand-meter scale cable-stayed bridge under permanent loads, and the result of analysis showed that the method is easy to apply and effective.

[**Key words**] cable-stayed bridge; first order optimization method; reasonable finished dead state